

**Farklı Eğim Açılı Levhalarla Sınırlandırılmış Çarpan Slot ve Dairesel Jetlerde Taşınım İle Isı Transferi Etkilerinin Karşılaştırılması****Haluk KELEŞ¹ ve Yücel ÖZMEN²**

How to cite: Keleş, H., & Özmen, Y. (2024). Farklı eğim açılı levhalarla sınırlandırılmış çarpan slot ve dairesel jetlerde taşınım ile ısı transferi etkilerinin karşılaştırılması. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 331-350. <https://doi.org/10.33484/sinopfbd.1436134>

Araştırma Makalesi**Sorumlu Yazar**Haluk KELEŞ
hkeles@artvin.edu.tr**Yazarlara ait ORCID**H.K: 0000-0002-6562-8902
Y.Ö: 0000-0003-1127-1060**Received:** 13.02.2024**Accepted:** 18.07.2024**Öz**

Bu çalışmada, farklı eğim açılı levhalarla sınırlandırılmış çarpan slot ve dairesel türbülanslı hava jetlerinde, hedef çarpma levhası yüzeyleri boyunca ısı transfer karakteristikleri etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sınırlayıcı levha eğim açısının $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ve 45° , levhalar arası açıklık oranı $H/W(D) = 0.5, 1, 3, 6$ ve Reynolds sayısının 20000 ile 30000 değerleri için hedef çarpma levhası boyunca termal kamera ile yüzey sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlenen sıcaklık değerlerinden hesaplanan Nusselt dağılımları, sınırlayıcı levha eğim açısı, Reynolds sayısı (Re) ve levhalar arası açıklık oranı parametrelerine göre incelenip değişimler değerlendirilmiştir. Hem slot hem de dairesel jetlerde, levhalar arası açıklık oranının $H/W(D) \leq 1$ ve sınırlayıcı levha eğim açısının $\theta \leq 15^\circ$ olduğu durumlarda, çarpma levhası üzerindeki Nusselt sayısı dağılımlarında ikincil pikler oluşmaktadır. Levhalar arası açıklık oranı arttıkça, ikincil piklerin etkisi azalmakta ve konumları levha uçlarına doğru kaymaktadır. Artan sınırlandırıcı levha eğim açısı ile birlikte, slot jetlerde ikincil pikler hızla kaybolurken, dairesel jetlerde bu durumun daha yavaş olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dairesel jet, eğimli sınırlandırıcı levha, ikincil artışlar, Nusselt dağılımları, Slot jet

Comparison of Convective Heat Transfer Effects in Impinging Slot and Circular Jets Confined by Plates With Different Inclination Angles¹Artvin Çoruh Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, Artvin, Türkiye²Karadeniz Teknik Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü,
Trabzon, Türkiye**Abstract**

In this study, the effects of heat transfer characteristics along the target impingement plate surfaces in impinging slot and circular turbulent air jets confined by plates with different inclination angles are experimentally investigated. Surface temperature measurements were conducted with a thermal imaging camera on the target impingement plate for inclination angles of confinement plate $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and 45° , rate of plate-to-plate spacing $H/W(D) = 0.5, 1, 3, 6$ and Reynolds numbers (Re) 20000 and 30000. The Nusselt distributions calculated from the measured temperature values are analyzed and the changes are evaluated according to the confining plate inclination angle, Reynolds number and rate of plate-to-plate spacing parameters. For both slot and circular jets, secondary top points become visible in the Nusselt number distributions on the impingement plate when the rate of plate-to-plate spacing is $H/W(D) \leq 1$ and the inclination angle of confinement plate is $\theta \leq 15^\circ$. As the interval among the plates increases, the influence of the secondary top points decreases and their positions shift towards the plate ends. As the

Giriş

Uçaklarda buzlanmanın engellenmesi, cam ve metallerin temperlenmesi, kâğıt ve kumaş ürünlerinin kurutulması, gaz türbin kanatlarının soğutulmasının yanı sıra elektronik devre elemanların soğutulması gibi çeşitli uygulamalarda jet akışlarına başvurulmaktadır. Çoklukla ısı transferini arttırmak için kullanılan jet akışları, türbülans modellerinin gelişimine de katkı sağlamaktadır. Çarpma jet akışlarında ısı transferinde, akışkan türü, miktarı ve sıcaklığı, akışın çıktığı lülenin geometrisi ve çapı, lüle-levha arası açıklık oranı, jet çıkışındaki akış hızı ve türbülans şiddeti, çevre ortam ve çarpma levhası sıcaklıkları, jetin sınırlandırılma durumu, çarpma levhasının geometrik şekli ve jet sayısı gibi birçok parametre etkili olmaktadır. Çarpma jetlerde, sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet uygulamaları, soğutma amaçlı olarak yaygın kullanılmaktadır. Akış alanında sınırlayıcı levhanın varlığı, lüle-levha arası açıklığın küçük değerlerinde karmaşık akış yapılarını oluşturmada, lüle-levha arası açıklığın büyük değerlerinde ise çarpma levhası yüzeyince ortaya çıkan duvar jetinin yayılımını geciktirmektedir [1]. Çarpma yüzeyindeki ısı transferinde iyileşme sağlamak amacıyla, sınırlayıcı levha/levhalar eğimli olarak da uygulanabilmektedir. Çarpma jet akışları konusunda literatürde, akış yapısını ve ısı transferi karakteristiklerini belirlenmesi amacıyla oldukça fazla sayıda deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır. Slot jetlere yönelik çalışmalar, dairesel jetlere göre daha az sayıdadır. Gardon ve Akfirat [2] çarpma slot jet akışını deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, slot lüle çıkışındaki akışın türbülans şiddeti ve derecesinin ısı transferi üzerindeki etkisinin açıklığın 6'dan büyük olduğu durumlarda nispeten küçük olduğunu ve ısı transferindeki ikincil artışların jet duvarı boyunca gelişen sınır tabakadaki akışın laminerden türbülansa geçişinden etkilendiğini ifade etmişlerdir. Livingood ve Hrycak [3] gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda potansiyel öz bölgesinin, dairesel jetler için lüle çıkışından itibaren lüle çapının 7 katına ve slot jetler için slot genişliğinin 7.7 katına kadar uzandığını ifade etmişlerdir. Senter ve Sollic [4] hareketli düz bir yüzeye çarpma sınırlandırılmış türbülanslı slot hava jetini, parçacık görüntüleme ile hız ölçümü (PIV) yöntemi kullanılarak incelemişlerdir. Lüle-levha arası açıklık oranının $H/W \leq 0.5$ olduğu durumlarda (H-sınırlayıcı levha ile çarpma levhası arasındaki mesafe, W-slot lüle genişliği), hız dağılımlarının Reynolds sayısından çok az etkilendiğini belirtmişlerdir. Konik levhayla sınırlandırılmış çarpma laminer slot su jeti akışını deneysel ve sayısal olarak inceleyen Cavadas ve ark. [5] konik levha üzerinde jet çıkışı civarında akışın ayrıldığını, ters akış bölgelerinin oluştuğu ve genişliğinin artan Reynolds sayısı ile doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Açılı levhalar kullanarak slot jeti sınırlayan Özmen ve Kınay [6], düz bir yüzeye çarptığı slot jetin, Reynolds sayısı, sınırlayıcı levha eğim açısı ve çarpma levhası açıklığının çarpma levhası üzerindeki basınç katsayısı ve Nusselt sayısı dağılımlarına etkisini incelemiştir. Basınç katsayısı

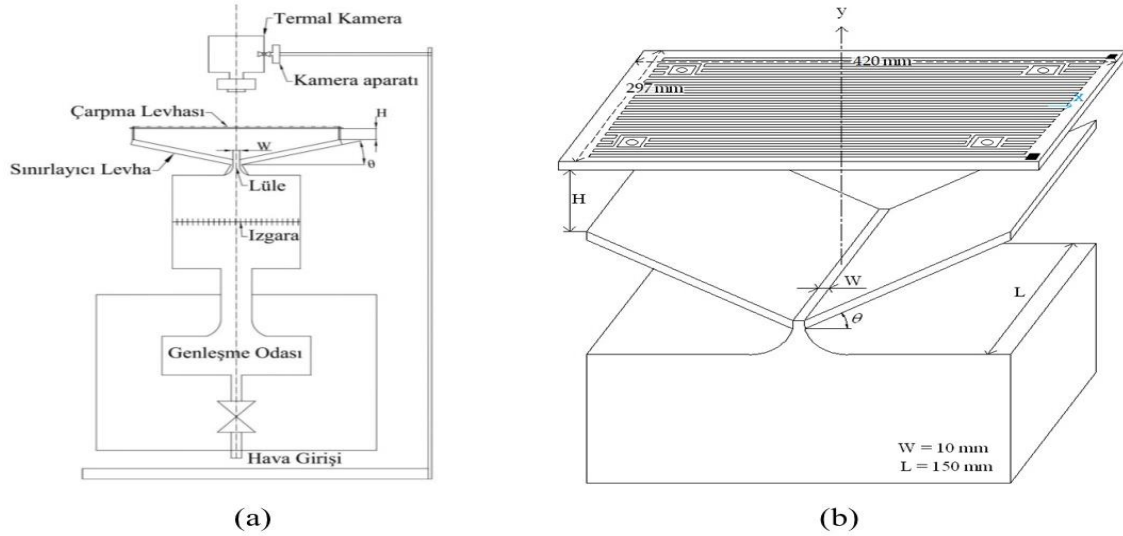
dağılımlarında gözlenen ikincil piklerin, artan sınırlandırıcı levha eğim açısı ile daha büyük r/D (r -çarpma jet merkez ekseninden olan radyal mesafe, D -daireysel jet lülesi çapı) konumlarına kaydığını ve levhalar arası açıklığın 1'den küçük değerlerde çarpma levhası uçlarına doğru Nusselt sayılarında artış olduğunu belirtmiştir. Çarpma slot jetlerle ilgili gerçekleştirdikleri sayısal bir çalışmada Kunugi ve Kawamura [7], çarpma yüzeyi üzerindeki ısı transfer karakteristiklerini incelemişlerdir. Farklı slot genişlikleri, lüle-levha arası açıklık oranları ve Reynolds sayıları için sınırlandırma etkisini inceledikleri çalışmada, sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış çarpma jet durumlarına ait sıcaklık dağılımlarının benzer olduğunu belirtmişlerdir. Chiriac [8] tarafından yapılan bir diğer sayısal çalışmada, slot jetlerde sınırlandırıcının potansiyel öz uzunluğunu arttırdığı ve türbülans seviyesini ve durma noktasındaki ısı transferi performansını azalttığı ifade edilmiştir. Yousefi-Lafouraki ve ark. [9], hem çarpma levhasının hem de sınırlayıcı levhanın eğimli olduğu çalışmalarında, akış ve ısı transferi etkilerini sayısal olarak modelleyip incelemişlerdir. Düşük eğim açılarında gerçekleştirilen çalışmada, eğim açısının artmasıyla ortalama Nusselt sayısının arttığını göstermiştir. Çarpma daireysel jetler konusunda literatürde oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir kısmı ise ısı transferi üzerine odaklanmıştır. Schrader [10] tarafından daireysel jetlerle ilgili gerçekleştirilen bir çalışmada, çarpma bölgesinin jet lülesi çapının %20 fazlasına dek genişlediğini bildirilmiştir. Sınırlandırılmamış akış koşullarında, önceden ısıtılan bir yüzeye çarpma daireysel sıcak hava jetlerindeki taşınım ile ısı transferini yaptıkları deneysel bir çalışmada inceleyen Goldstein ve ark. [11], ısı transfer katsayısının çevre ortam ile hava jetinin sıcaklık farkından bağımsız olduğunu, ancak çarpma levhası ile hava jeti arasındaki sıcaklık farkının bu katsayı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Baughn ve Shimizu'nun [12] yürüttüğü bir deneyde, artan lüle ve levha arasındaki mesafeyle birlikte çarpma levhasındaki yerel ısı transfer katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Popiel ve Trass [13], daireysel bir lüleden çıkan çarpma jet akışında, akış alanını duman yöntemiyle görüntülemişlerdir. Halka şeklinde ortaya çıkan girdapların küçük lüle-levha arası açıklık oranlarında duvar jeti bölgesi boyunca yoğunlaştığını ifade etmişlerdir. Çarpma daireysel jetlerde, Mohanty ve Tawfek [14], çarpma levhası yüzeyi boyunca ısı transfer katsayısının durma bölgesinde maksimum pik değeri aldığını, sonrasında levha yüzeyi boyunca radyal doğrultuda üstel bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Benzer bir çalışma olan Huang ve El-Genk'in [15] çalışmasında, ortalama Nusselt sayısının $Re^{0.76}$ ile doğru orantılı olduğu belirtilmektedir. Küçük Lüle-levha arası açıklık oranı ($H/D < 1$) değerlerinde, Lytle ve Webb [16], termal kamera kullanarak çarpma levhası üzerindeki sıcaklık dağılımlarını elde ettikleri çalışmalarında, çarpma bölgesi dışında ısı transferi karakteristik dağılımlarında ikincil artışların meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Isı transfer katsayılarında meydana gelen bu ikincil artışları, çarpma yüzeyi boyunca gelişen duvar jetinde akışın laminerden türbülansa geçişi ile ilişkili olduğunu açıklamışlardır. Sınırlandırılmış çarpma daireysel jet akışı içinde, Colucci ve Viskanta [17], açıklık oranının 0.25 - 6 aralığındaki değerleri için termokromik sıvı kristal kullanarak, çarpma levhası boyunca yerel ısı transferi karakteristiklerini gözlemlemişlerdir. Isı transferi karakteristik ve performansının sınırlandırılmış jet koşulları altında, Reynolds sayısı ve lüle-

levha arası açıklığın sınırlandırılmamış jette olduğundan daha fazla etkilendiğini ifade etmişlerdir. Sınırlandırılmış çarpan jet akışlarında Baydar [18] ile Baydar ve Özmen [19], 500 ila 50000 aralığındaki Reynolds sayıları için yaptıkları çalışmalarda, 2700'den büyük Reynolds sayısı değerleri ve 2'den küçük lüle ile çarpma levhası arası açıklık oranları için levha yüzeyinde ortam altı (subatmosferik) basınç bölgelerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sınırlandırılmamış akış durumunda, önceden ısıtılmış bir levhaya çarpan dairesel jet üzerine bir çalışma yapan Özmen ve Baydar [20], akış yapısı ve ısı transferi performans ve karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çarpma yüzeyi boyunca Nusselt sayısındaki zirvelerin türbülans şiddetindeki piklerle uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir. Çarpan laminer jet akışını sınırlandırılmamış durumun yanı sıra sınırlandırılmış durum için de hem sayısal hem de deneysel olarak inceleyen Miranda ve Campos [21], Reynolds sayısı aynı iken, sınırlandırılmış jetlerde akış alanlarındaki ters akış bölgelerinin daha uzun olduğunu ifade etmişlerdir. Behnia ve ark. [22], yaptıkları sayısal çalışmada, sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış jet akışı durumlarını incelemişler ve sınırlandırmanın genel olarak çarpma yüzeyindeki ortalama ısı transferini azalttığını ifade etmişlerdir. Sınırlandırıcının ısı transferi performansındaki pozitif etkisinin lüle-levha arası açıklığın 0.25'ten daha küçük değerlerinde ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Çarpan jetlerde, Herrero ve Buchlin [23], lüle geometrik şeklinin yerel ısı transferi dağılımı üzerinde etkisini deneysel olarak incelemişler ve çeşitli lüle geometrik eklentilerinin yerel ısı transferi dağılımını nasıl etkilediğini açıklamışlardır. Lee ve ark. [24], laminer çarpan slot jet akışını deneysel ve sayısal olarak incelemiş ve Reynolds sayısının, lüle ile hedef levha arasındaki aralığın ve yerel Nusselt sayısının akış alanı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Cavadas ve ark. [25], konik bir plaka ile sınırlandırılmış laminer slot su jeti akışını deneysel ve sayısal olarak incelemiş ve akışın konik plaka üzerinde jet çıkışına yakın ayrıldığını ve ters akış bölgelerinin uzunluğunun Reynolds sayısı ile arttığını belirtmişlerdir. Al Mubarek ve ark. [26] tarafından yürütülen deneysel çalışmada, çarpan jet akışına maruz kalan eğimli bir yüzey üzerindeki ısı transferi etkileri incelenmiştir. Reynolds sayısı arttıkça ortalama yerel Nusselt sayısının da arttığı ifade edilip aralarında doğrudan bir ilişki olduğu vurgulanmıştır. Yousefi-Lafouraki ve ark. [27] hem çarpan hem de sınırlayan plakaların eğimli olduğu çarpan yarıklı jet akışında akış ve ısı transferi etkilerini sayısal olarak incelemiş ve ortalama Nusselt sayısının artan eğim açısı ile arttığını göstermişlerdir. Bhagwat ve Sridharan [28] eğimli bir yüzeye çarpan jet akışındaki ısı transferi etkilerini sayısal olarak incelemişler ve Nusselt dağılımının, özellikle çarpma plakasının düşük eğim açılarında, lüle ve levha arasındaki aralıktan önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Li ve ark. [29], düz bir yüzeye belli bir açıyla çarpan çoklu jetlerin neden olduğu ısı transferi etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişler ve Reynolds sayısının, lüleler arasındaki mesafenin ve lüle-hedef levha aralığının çarpma yüzeyindeki ısı transferi üzerinde önemli etkileri olduğunu vurgulamışlardır. Di Venuta ve ark. [30], dikdörtgen profilli bir lüleden çıkan türbülanslı slot jet akışında, hedef duvar yüzeyindeki Nusselt sayısı dağılımlarını LES türbülans modeliyle incelemişler ve literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarıyla diğer türbülans modellerine kıyasla daha iyi bir uyum bulmuşlardır. Joshi ve Sahu [31], farklı geometrik

çıkıntılara sahip iç bükey bir yüzeye çarpan jet akışında ısı transferi karakteristiklerini sayısal olarak incelemişler ve çıkıntı varlığının ısı transferi oranında iyileşme sağladığını belirtmişlerdir. Talapati ve Katti [32], sentetik hava jeti sıcaklığının çarpan sentetik hava jetinin yerel ısı transferi dağılımı üzerindeki etkisini pürüzsüz düz bir yüzey üzerinde deneysel olarak incelenmişler ve ısı transferi dağılımının özellikle düşük orifis-jet mesafesinde sentetik hava jeti sıcaklığından güçlü bir şekilde etkilendiği ifade etmişlerdir. Javidan ve Moghadam [33], çarpan jet dizisi ile fotovoltaik bir modülün soğutmasında nanoakışkan kullanımının etkisini deneysel olarak incelemişler ve nanoakışkana sahip çok delikli nozulların kullanılması durumunda fotovoltaik modülün daha düzgün sıcaklık dağılımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, çarpma levhası yüzeylerindeki ısı transferi karakteristiklerinin farklı eğim açılı levhalar ile sınırlandırılan çarpan türbülanslı slot ve dairesel hava jetleri üzerinde deneysel olarak incelenmesine yoğunlaşmaktadır. Reynolds sayısının, levhalar arası mesafenin ve sınırlandırıcı levha eğim açısının çarpma levhası yüzeyi boyunca Nusselt dağılımlarına olan etkisinin belirlenmesi, bu çalışmanın ana amacıdır ve bu amaç doğrultusunda çarpma levhası üzerindeki sıcaklık dağılımları termal kamera ile ölçülerek incelenmiştir. Ayrıca, çalışma, slot ve dairesel jet durumlarının karşılaştırmalı analizi ve sınırlandırıcı levhaların eğim açısının etkisinin belirlenmesi açısından özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

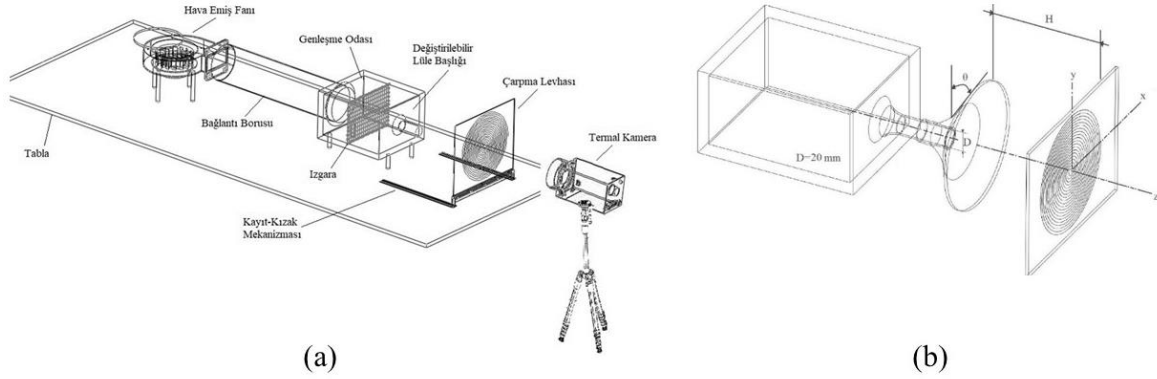
Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında, $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ve 45° açılara (θ – Sınırlandırıcı levhanın normal düzlemi ile yaptığı açı) sahip eğimli levhalar kullanılarak sınırlandırılan çarpan slot jet ve çarpan dairesel jet akış düzeneklerinde, levhalar arası mesafenin ($H/W(D)$) 0.5, 1, 3 ve 6 olduğu ve iki farklı Reynolds sayısı (20000 ve 30000) için önceden ısıtılmış çarpma levhasının arka yüzeyi boyunca merkez eksen doğrultusunda termal kamera ile yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Çarpan slot jet akışı için, çarpma levhası boyunca ısı transferi karakteristiğini incelemek amacıyla oluşturulan, $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ve 45° eğim açılına sahip levhalar ile sınırlandırılan düşey eksenli akış düzenekleri, Plint and Partners Limited üretimi seri numarası TE.88/3961 olan bir hava üfleyici sistem modifiye edilerek kullanılmıştır. Hava üfleyici cihaz fanı; 0.45 kW güce ve dakikada 2800 devir dönüş hızına sahip bir elektrik motoruyla tahrik edilmektedir. Şekil 1a'da gösterilen deney düzeneğinde, fanla desteklenen hava huzme cihazına çekilir ve ardından genleşme odası ve ızgara aşamalarını geçerek, düşey doğrultuda yerleştirilen akış düzeneklerine iletilmektedir. Debi ayar valfi yardımıyla lüle çıkışında istenilen hız değerleri elde edilebilmektedir.



Şekil 1. Eğimli levhalarla sınırlandırılmış düşey eksenli çarpma slot jet deney düzeneğinin şematik görüntüsü. (a) genel görünüm; (b) ayrıntılı izometrik görünüm

Lüleden çıkan hava jeti, üzerinde sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirildiği epoksi malzemeden imal edilmiş ve elektriksel olarak ısıtılmış çarpma levhasına çarpmaktadır. Epoksi levhanın arka yüzeyi üzerinde sıcaklık ölçümleri, termal kamera ile yüzeye dik bir doğrultuda gerçekleştirilmektedir. θ , sınırlayıcı levha eğim açısını, H, levhalar arası açıklığı ve W, slot genişliğini göstermektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan ve Şekil 1b’de örnek görüntüsü verilen akış düzeneklerinde, genişliği (W) ve uzunluğu (L) sırasıyla 10 mm ve 150 mm olan tekli slot lüleler kullanılmıştır. Slot lüle için eşdeğer hidrolik çap (D_h) ise 18.75 mm’dir. $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ve 45° eğim açılarında sahip levhalar lüle çıkışlarına enlemesine yerleştirilerek akış alanları sınırlandırılmıştır. Hava jetleri lülelerden çıkarak, sınırlayıcı levha uçlarından H değeri kadar uzak mesafede konumlandırılan ve lüle eksenine 90° açı ile bakan doğrultuda yerleştirilen elektriksel olarak ısıtılmış düz levhalara çarpmaktadır. Reynolds sayısının her iki değeri (20000 ve 30000) için, lüle çıkış hızları, lüle çıkışında konumsal harekete izin veren sabit tutacak üzerine yerleştirilen Pitot tüpü yardımıyla sırasıyla 16.53 m/s ve 24.8 m/s olarak ölçümlenmiştir. Epoksi malzemeden üretilen çarpma levhası 1.5 mm kalınlığa, 297mm genişlik ve 420 mm uzunluk ebadında yüzey alanına sahiptir. Üniform sıcaklık dağılımını çarpma levhasında sağlamak amacıyla, PCB (Printed Circuit Board - Baskılı Devre Kartı) yöntemi ile 1 mm genişliğinde ve $40 \mu\text{m}$ kalınlığında bakır şeritlerle elektriksel bir devre oluşturulmuştur. PCB çarpma levhasının arka yüzeyi mat siyah renktedir. Düşey eksenli jet düzeneğinde, hedef levha (PCB çarpma levhası) boyunca, ayarlanabilir bir varyak ile 75 Volt gerilim ve 2.02 Amper alternatif akım kullanılarak sabit ısı akısı 1375 W/m^2 değerinde oluşturulmuştur. Yatay eksenli çarpma dairesel jet deney düzeneği, hedef çarpma levhası üzerindeki ısı transferinin incelenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Şekil 2a’da şematik olarak gösterilen deney düzeninde, fan tarafından emilen ortam hava, yatay bir bağlantı borusu aracılığıyla genleşme odasına yönlendirilir. Genleşme odasının çıkışına yerleştirilen dairesel jetten çıkan hava, Joule etkisi ile önceden ısıtılan hedef çarpma levhasına çarptırılmaktadır.

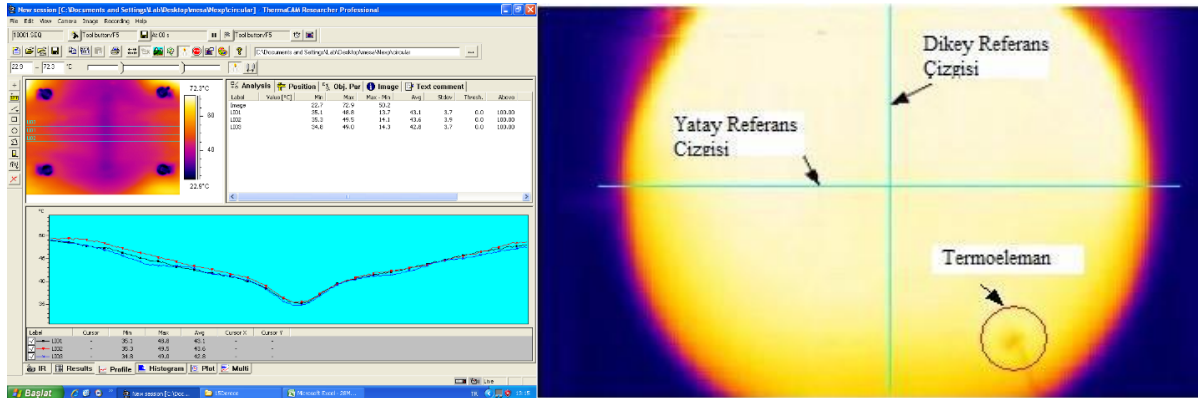


Şekil 2. Yatay eksenli çarpma dairesel jet deney düzeneğinin şematik görüntüsü. (a) genel görünüm; (b) lüle ve çarpma levhası ayrıntılı görünüm

Düşey konumda bulunan ısıtıcı çarpma levhası, kayıt-kızak mekanizması ile yatay doğrultuda hareket kabiliyetine kazanmıştır. Bu mekanizma ile lüle ve levha arası mesafe istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Fan girişindeki kapak açıklığı ile farklı akış debileri ayarlanabilmektedir. Yüzeysel sıcaklık dağılımlarının ölçümü, PCB levhanın arka tarafında, levha yüzeyine dik doğrultuda konumlandırılmış bir tripod üzerine kurulu termal kamera ile gerçekleştirilmiştir. Yatay eksenli çarpma dairesel jet deney düzeneğinde, lüle çıkışına yerleştirilen farklı θ eğim açlarına sahip sınırlayıcı levhalarla oluşturulan sınırlandırılmış dairesel jet akış düzeneklerinin örnek şematik görüntüsü Şekil 2b'de verilmiştir. Dairesel lülenin çapı (D) 20 mm, lüle uzunluğu ise 80 mm olarak gerçekleştirilmiştir. Hava jeti, lüleden çıktıktan sonra, belirli bir H değeri kadar açıklıkta konumlandırılan ve jet eksenine dik bir doğrultuda bulunan Joule etkisi ile önceden ısıtılan levhalara çarpar. Reynolds sayısı 20000 ve 30000 değerleri için, konumsal harekete izin veren sabit tutacak üzerine yerleştirilen Pitot tüpü yardımı ile lüle çıkışındaki akış hızlarının 15.10 m/s ve 22.65 m/s olduğu saptanmıştır. Kalınlığı 1.5 mm olan hedef çarpma levhasının dairesel ısıtıcı yüzeyinde, tekdüze sıcaklık dağılımının sağlanması amacıyla baskılı devre kartı (PCB) tekniği ile 1 mm genişliğinde ve 40 μm kalınlığında bakır şeritlerle dairesel bir elektrik devresi oluşturulmuştur. 300x400mm² dikdörtgen yüzey alanına sahip levhada, dairesel jet akışı ile uyumluluk dikkate alınarak 180mm'lik çapta dairesel form ısıtıcı yüzeyi oluşturulmuştur. Bu ısıtıcı çarpma levhasının arka yüzeyi mat siyah renge sprey boya ile boyanmıştır. Epoksi levhanın emisivitesi 0.95 dir. Yatay eksenli jet düzeneğindeki hedef PCB çarpma levhası üzerine ayarlanabilir varyak kullanılarak 20.3 volt ve 2.01 amper elektrik akımı uygulanmış ve 1603.5 W/m² düzeyinde sabit ısı akışı oluşturulmuştur.

Hem çarpma slot jeti hem de çarpma dairesel jet durumlarında, hedef levhaya çarpma ortam hava sıcaklığındaki jetin, levhadan gerçekleşen ısı transferi, önceden ısıtılan levhanın arka yüzeyine dik doğrultuda konumlandırılmış olan termal kamera ile sıcaklık dağılımı ölçümleri şeklinde yapılarak incelenmiştir. -40°C ila +500 °C aralığında ölçüm yapabilen, 0.08 °C sıcaklık hassasiyetine ve QVGA (Quarter Video Graphics Array - Çeyrek Video Grafik Dizisi) yani 320x240 piksel çözünürlüğe sahip FLIR A20 marka termal kamera ile yüzey sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri,

ThermaCAM yazılımı kullanılarak kayıt altına alınmıştır (Şekil 3). Çarpma levhasının her iki yüzeyine yerleştirilen T tipi termokupllar ile termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin doğrulaması yapılmıştır. Termoelemanla ölçülen levhanın gerçek sıcaklığı ve bilgisayarda okunan levha sıcaklığı arasındaki karşılaştırmayla, termal kameranın kalibrasyon eğrisi çıkarılmış, ölçüm sonuçları doğrulanmıştır. Bu yöntem ile çarpma yüzeyindeki sıcaklığın arka yüzeye eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Çarpma yüzeyine yerleştirilen termokupl tarafından ölçülen sıcaklık değeri, aynı nokta için termal kamera tarafından ölçülen sıcaklık değeri ile karşılaştırılarak yüzeyin emisivite değeri (ϵ) 0.98 olarak belirlenmiştir. Çarpma levhası yüzeyindeki sıcaklık değerleri, yerel sıcaklıkların zaman içinde değişmediği ve akışın sürekli bir duruma ulaştığı süre boyunca kaydedilmiştir.



Şekil 3. Sıcaklık ölçümüne ilişkin görüntüler

Isı Transferi Parametreleri ve Matematiksel Formülasyon

U_0 , dairesel veya slot hava jeti çıkış hızını ifade etmekte olup, bununla ilişkilendirilen Reynolds sayısı aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

$$U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (1)$$

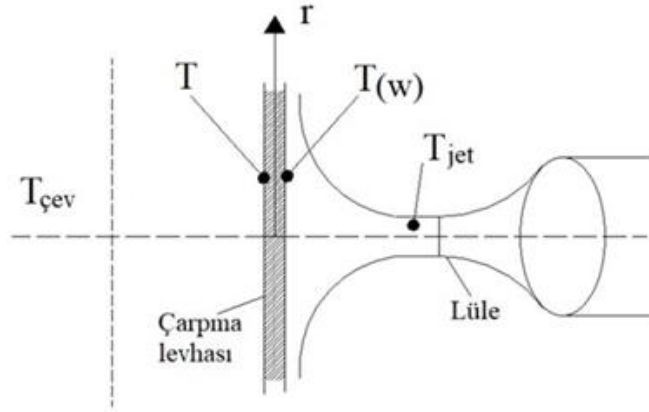
$$Re = \frac{\rho U_0 D(W)}{\mu} \quad (2)$$

Denklemlerde, basınç farkı ΔP , akışkan yoğunluğu ρ , dinamik viskozite μ ile gösterilmekte olup, lüle çapı D , slot genişliği ise W ile ifade edilmiştir. Isı transferi etkileri, çarpan jet akışlarında çarpma levhaları üzerindeki ısı taşınım katsayısı (h) ve boyutsuz Nusselt sayısı (Nu) denklemleri ile araştırılır.

$$h = Q_{\text{taşınım}}/A_w(T_w - T_j) \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hD(W)}{k} \quad (4)$$

Burada taşınım ile ısı akısı $Q_{\text{taşınım}}$, levhanın ısıtıcı yüzey alanı A_w , levhanın jete maruz kalan tarafındaki yüzey sıcaklığı T_w , ve jet çıkış sıcaklığı ise T_j ile ifade edilmektedir. Nusselt denkleminde, havanın ısı iletim katsayısı k ile tanımlanmıştır. Düz bir yüzeye çarpan jet akışında ısı transferi üzerine etkili olan büyüklükler Şekil 4'te şematik bir şekilde tasvir edilmiştir.



Şekil 4. Jetlerde ısı transferi hesaplamalarında dikkate alınan tanımlamalar

Termal kamera yardımıyla ölçümlenen yüzey sıcaklığı T ile gösterilmiş olup, çevre ortam sıcaklığı $T_{\text{çev}}$, levha yüzeyinin jete maruz kalan tarafındaki sıcaklığı ise $T_{(w)}$ ile gösterilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği laboratuvar ortamının sıcaklığı bir termometre ile 295 K olarak tespit edilmiştir.

Joule etkisi ile üretilen toplam ısı akısı q''_{toplam} 'dan ısı kayıplarının çıkarılması ile $q''_{\text{taşınım}}$ hesaplanmıştır. Enerji dengesi ile çarpma levhası yüzeyinden olan ısı transferi,

$$q''_{\text{taşınım}} = q''_{\text{toplam}} - q''_{\text{iletim}} - q''_{\text{ışınım}} - q''_{\text{doğaltaşınım}} \quad (5)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir. İfadeye göre, burada q''_{toplam} , toplam ısı akısı miktarını, q''_{iletim} , $q''_{\text{ışınım}}$ ve $q''_{\text{doğaltaşınım}}$ ise sırasıyla çarpma yüzeyinden iletimle, ışınlama ve doğal taşınım ile kaybedilen ısıyı temsil eder. Epoksi levhaya uygulanan toplam güç, ayarlı varyak tarafından sağlanan gerilim ve levha direnci değerleri kullanılarak hesaplanır ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$Q_{\text{toplam}} = IV = V^2/R \quad (6)$$

Isıl kayıplar, levhanın jet tarafından etkilenmeyen yüzeyi boyunca ışınlama, iletim ve doğal taşınım etkilerine bağlıdır. Çarpma levhası üzerindeki radyal yönde iletimle oluşan ısı transferi, radyal yönde mesafenin fazla olması ve sıcaklık gradyanının az olması sebebiyle dikkate alınmamıştır. Levhanın jete maruz kalan tarafındaki ışınlama kayıpları ise bakırın düşük emisivite değeri sebebiyle ihmal edilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi ile çevre ortamı arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ışınlama yoluyla ısı transferi, aşağıda verilen Stefan-Boltzmann denklemi [34] kullanılarak hesabı gerçekleştirilmiştir.

$$q_{\text{ışınım}} = \varepsilon A_s \sigma (T_w^4 - T_{\text{çev}}^4) \quad (7)$$

Çarpma levhasının emisivite değeri ε ile gösterilmektedir. Stefan-Boltzmann sabiti ise $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)] değerindedir. Burada A_s çarpma levhasındaki ısıtılan yüzeyin alanını temsil etmektedir. Yatay konumlandırılan çarpma levhası üzerinden doğal taşınım yoluyla oluşan ısı kaybı, Lloyd ve

Moran [35] tarafından üretilen empirik bağıntı ile aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır. Bu bağıntıda Ra, Rayleigh sayısını ifade etmektedir.

$$Nu_L = 0.15Ra^{1/3} \quad 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \quad (8)$$

Slot jet akışında laboratuvar ortam şartları için Prandtl sayısı (Pr) 0,7 olarak belirlenmiş olup yatay konumlandırılmış çarpma levhası için $Ra=2.04 \times 10^8$ olarak hesaplanmıştır. Düşey olarak konumlandırılmış çarpma levhası üzerinden doğal taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, Churchill ve Chu [36] tarafından sunulan aşağıdaki empirik bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra \leq 10^9 \quad (9)$$

Dairesel jet akışında laboratuvar ortam şartları için Prandtl sayısı (Pr) 0,7 olarak belirlenmiş olup düşey konumlandırılmış çarpma levhası için $Ra=1.6 \times 10^7$ olarak hesaplanmıştır. Bu denklemlerde, Rayleigh sayısını Ra ve Prandtl sayısı ise Pr ile ifade edilmiştir. Verilen bu denklemleri kullanarak, slot jet düzeneğinde gerçekleşen ısı kayıplarından doğal taşınım ve ışınım kayıpları, toplam ısı miktarının sırasıyla %5'i ve %7'si olarak, dairesele jet düzeneğinde gerçekleşen kayıplar ise doğal taşınım için toplam ısı miktarının %3'ü, ışınım kayıpları için ise %4'ü olarak hesaplanmıştır. Slot jet akışında, toplam kayıplar, toplam ısı akısının %12'si, dairesele jet akışında ise %7'si değerinde olmaktadır.

Belirsizlik Analizi

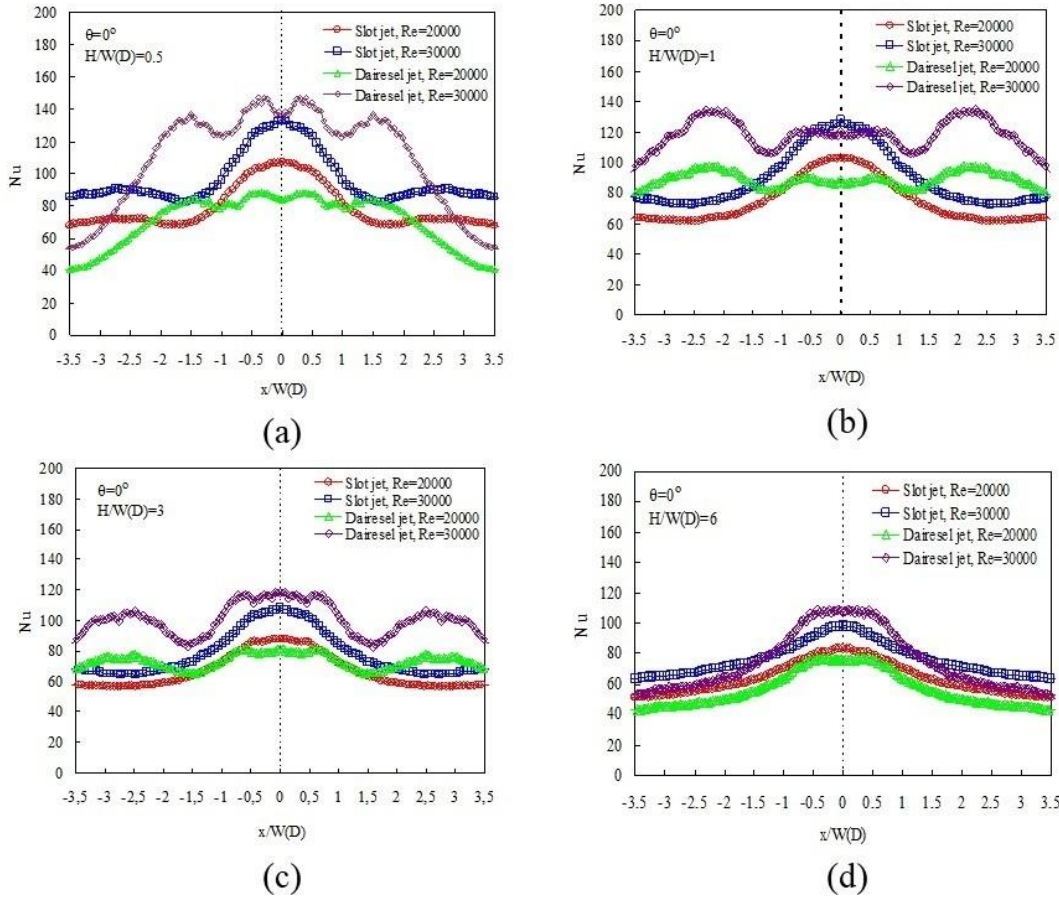
Ölçümler, Kline ve McClintock [37] tarafından tavsiye edilen denklem ve hesaplama yöntemi kullanılarak belirsizlik analizine tabi tutulmuştur. İncelenen Reynolds sayısı için hesaplanan belirsizlik oranı $\pm \%2.61$ iken, Nusselt sayısı için $\pm \%2.87$ seviyesindedir.

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, farklı eğim açılı levhalar ile sınırlandırılmış türbülanslı slot ve dairesele hava jetlerinde çarpma yüzeyleri üzerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çarpma levhası boyunca sıcaklık değerleri, önceden ısıtılan levhanın yüzeyinin arka yüzeyi boyunca levha yüzeyine dik konumlandırılmış bir termal kamera yardımı ile ölçülerek kaydedilmiştir. Sıcaklık dağılımları ise çarpma levhasının merkez eksenine doğrultusunda çizilen bir hat üzerinde elde edilmiştir. Bu sıcaklık dağılımları kullanılarak, Reynolds sayısı, levhalar arası açıklık oranı, sınırlandırıcı levha eğim açısı ve lüle tipinin çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi incelenmiştir. Çarpma levhası üzerindeki sıcaklık dağılımları, çarpan slot jet ve çarpan dairesele jet deney düzeneklerinde Reynolds sayısının her iki değeri (20000 ve 30000), sınırlandırıcı levha eğim açısı değerlerinin $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ve 45° olduğu durumlar ve sınırlandırıcı levha ile hedef çarpma levhası arasındaki açıklık oranı değerlerinin $H/D(W) = 0.5, 1, 3$ ve 6 olduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir.

$\theta = 0^\circ$ Eğimli Levhalar ile Sınırlandırılmış Jet

Sınırlandırıcı levha eğim açısı $\theta=0^\circ$ için, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde slot ve dairesel jet akış sistemlerinde çarpma levhası merkez eksenini doğrultusunda elde edilmiş olan Nusselt dağılımları levhalar arası açıklık oranı değerleri $H/W(D)=0.5, 1, 3$ ve 6 olduğu durumlar için Şekil 5'te verilmiştir.



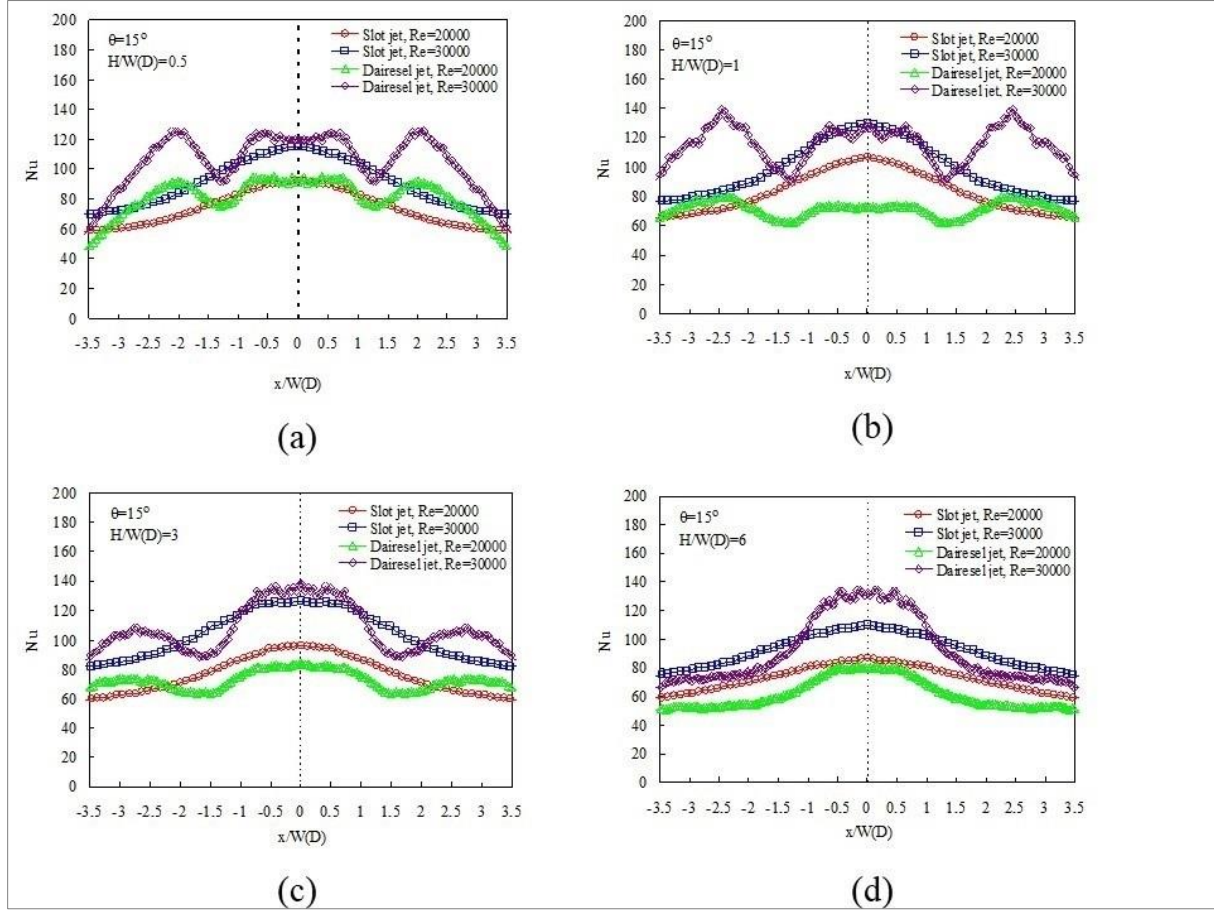
Şekil 5. $\theta=0^\circ$ için çarpma levhası boyunca Nusselt dağılımları. (a) $H/W(D)=0.5$, (b) $H/W(D)=1$, (c) $H/W(D)=3$, (d) $H/W(D)=6$

$H/W(D)=0.5$ değeri için, iki farklı Reynolds sayısında slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde orta eksen boyunca Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 5a'da, artan Reynolds sayısı ile birlikte Nusselt değerlerinin çarpma levhası üzeri boyunca artış sergilediği anlaşılmaktadır. Çarpma levhaları üzerinde lüle eksenini doğrultusundaki durma noktalarında yerel Nusselt sayıları maksimum değer almaktadır. Çarpma levhaları üzerindeki Nusselt dağılımlarında ortaya çıkan ikincil pikler slot jetlerde durma noktasından $x/W \approx \pm 2.5$ (Slot jetlerde boyutsuz x-eksenindeki mesafe) kadar ileri konumunda oluşurken, dairesel jetlerde $x/D \approx \pm 1.5$ (Dairesel jetlerde boyutsuz radyal eksenindeki mesafe) konumunda oluşmaktadır. İkincil pikler, artan Reynolds sayısı ile daha belirgin hale gelmektedir. $H/W(D)=1$ ve $H/W(D)=3$ açıklık oranları için, slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde farklı Reynolds sayısı durumları için Nusselt dağılım sonuçları Şekil 5b ve 5c'de görülmektedir. Her iki açıklık oranına ait Nusselt dağılımları da Şekil 4a'da $H/W(D)=0.5$ iken elde edilen dağılımlarla

benzerlik göstermektedir. Bu açıklık oranlarında, Nusselt dağılımlarındaki ikincil pikler, slot jetlerde etkisi azalmış şekilde durma noktasından itibaren $x/W \approx \pm 3.5$ konumunda, dairesel jetlerde ise $x/D \approx \pm 2.5$ konumunda gerçekleşmektedir. Şekil 5d’de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhaları üzerinde düşük açıklık oranlarında oluşan ikincil piklerin $H/W(D)=6$ açıklık oranında kaybolduğu ve slot ve dairesel jetlere ait profillerin birbirlerine yaklaştığı görülmektedir. Slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhaları üzerinde, farklı levhalar arası açıklık oranları ve farklı Reynolds sayıları için elde edilen Nusselt dağılımlarından, her iki Reynolds sayısı için de artan levhalar arası açıklık oranı ile Nusselt sayısının azaldığı anlaşılmaktadır. $Re=30000$ değerinde, çarpma levhaları üzerindeki Nusselt değerleri dairesel jette slot jete göre daha yüksek olmaktadır. Hem durma noktasındaki hem de ikincil piklerin olduğu konumlardaki Nusselt değerleri, artan Reynolds sayısı ile artmaktadır. Artan açıklık oranı ile ikincil pikler etkisini kaybederken, slot ve dairesel jetlerin Nusselt dağılım profilleri de birbirlerine yaklaşmaktadır.

$\theta = 15^\circ$ Eğimli Levhalar ile Sınırlandırılmış Jet

Sınırlandırıcı levha eğim açısı $\theta=15^\circ$ için, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde slot ve dairesel jet akış sistemlerinde çarpma levhası merkez eksenini üzeri boyunca elde edilen Nusselt dağılımları levhalar arası açıklık oranı değerleri $H/W(D)=0.5, 1, 3$ ve 6 olduğu durumlar için Şekil 6’da verilmiştir. Şekil 6a’da, $H/W(D)=0.5$ değeri için, iki farklı Reynolds sayısında slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde orta eksen boyunca Nusselt dağılımları görülmektedir. Artan Reynolds sayısı ile birlikte, çarpma levhası yüzeyi boyunca Nusselt değerlerinin de artış sergilediği görülmektedir. Hem slot jette hem de dairesel jette her iki Reynolds sayısı için de yerel Nusselt sayılarının durma noktasında maksimum değer aldığı anlaşılmaktadır.



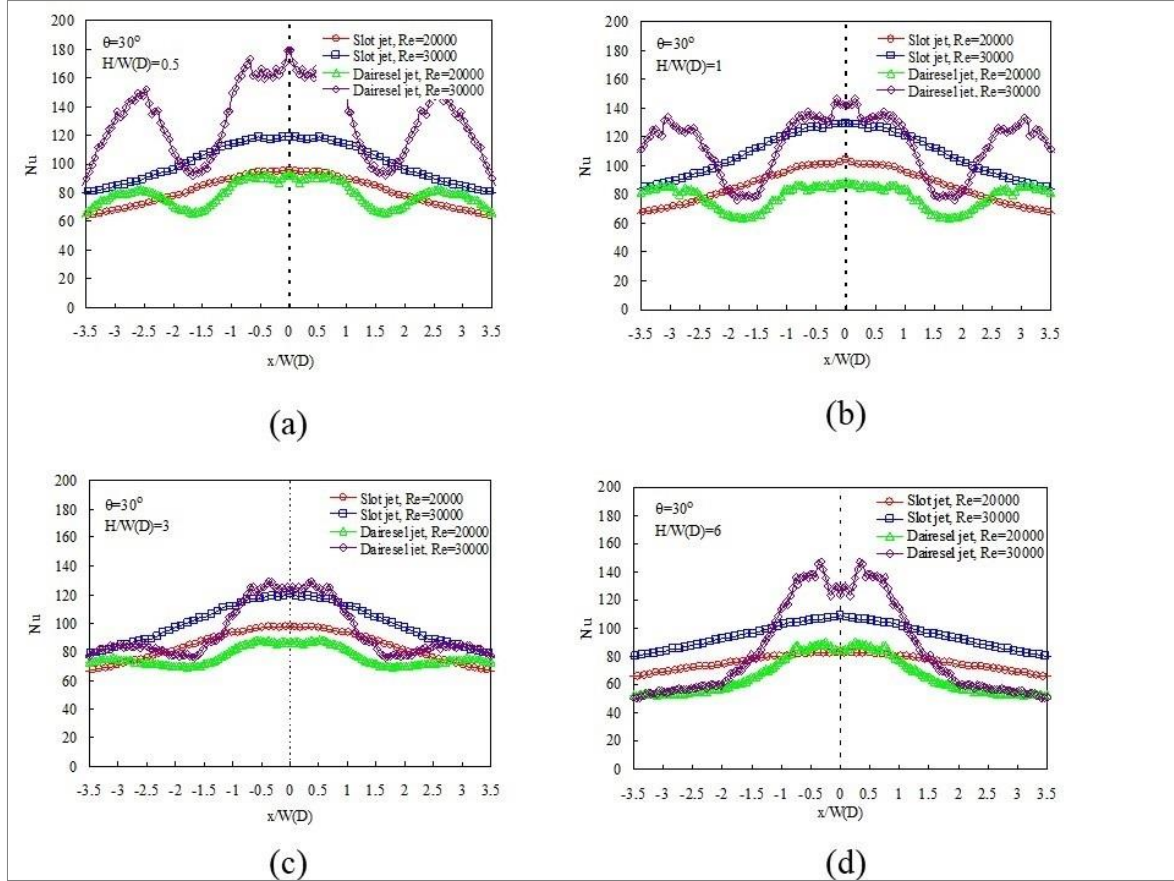
Şekil 6. $\theta = 15^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları. (a) $H/W(D) = 0.5$, (b) $H/W(D) = 1$, (c) $H/W(D) = 3$, (d) $H/W(D) = 6$

Dairesel jete ait Nusselt dağılımlarında, durma noktasından itibaren $x/D \approx \pm 0.5$ ve 2 konumlarında ikincil pikler oluşmaktadır. İkincil pikler artan Reynolds sayısı ile daha belirgin olmaktadır. Slot jete ait Nusselt dağılımları ise yayvan bir değişim göstermekte ve herhangi bir ikincil pik oluşmamaktadır. $H/W(D) = 1$ ve $H/W(D) = 3$ açıklık oranları için, slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde farklı Reynolds sayısı değerlerinde elde edilen Nusselt dağılımları Şekil 6b ve 6c'de verilmektedir. Her iki açıklığa ait Nusselt dağılımları da Şekil 5a'da $H/W(D) = 0.5$ iken elde edilen dağılımlarla benzerlik göstermektedir. $H/D = 1$ açıklık oranında, dairesel jete ait Nusselt dağılımlarındaki ikincil piklerin daha keskin hale geldiği ve konumlarının $x/D \approx \pm 0.5$ ve 2.5 değerlerine kaydığı görülmektedir. $H/D = 3$ açıklık oranında ise dairesel jete ait Nusselt dağılımlarındaki ikincil piklerin etkisi hafiflemektedir. $H/D = 6$ açıklık oranına ait Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 6d'de, dairesel jete ait Nusselt sayılarındaki ikincil piklerin kaybolduğu görülmektedir. Slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhaları üzerinde, farklı Reynolds sayıları ve farklı levhalar arası açıklık oranları için elde edilmiş Nusselt dağılımlarından, her iki Reynolds sayısı değeri için de levhalar arası açıklık oranı arttıkça Nusselt sayısı değerlerinin azalışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Dairesel jete ait çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarında, düşük levhalar arası açıklık oranlarında ($H/D < 3$) ortaya çıkan ikincil pikler, artan levhalar arası açıklık oranı

ile birlikte etkisini kaybetmektedir. Dairesel jete ait Nusselt dağılımlarında görülen ikincil piklerin konumu sınırlayıcı levhaların eğimli olması nedeniyle durma noktasından uzaklaşmaktadır.

$\theta = 30^\circ$ Eğimli Levhalar ile Sınırlandırılmış Jet

Sınırlandırıcı levha eğim açısı $\theta=30^\circ$ için, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde slot ve dairesele jet akış sistemlerinde çarpma levhası merkez eksenine doğrultulunca elde edilmiş Nusselt dağılımları levhalar arası açıklık oranı değerinin $H/W(D)=0.5, 1, 3$ ve 6 olduğu durumlar için Şekil 7’de verilmiştir. $H/W(D)=0.5$ değeri için, iki farklı Reynolds sayısında slot ve dairesele jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde orta eksen boyunca Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 7a’da, artan Reynolds sayısı ile birlikte çarpma levhası yüzeyi boyunca Nusselt değerlerinde artışlar oluştuğu görülmüştür. Çarpma levhaları üzerinde lüle eksenine doğrultusundaki durma noktalarında yerel Nusselt sayıları maksimum değer almaktadır. Dairesel jete ait Nusselt dağılımlarında, durma noktasından itibaren $x/D \approx \pm 1$ ve 2.5 konumlarında ikincil pikler oluşmaktadır. İkincil pikler artan Reynolds sayısı ile daha belirgin olmaktadır. Slot jete ait Nusselt dağılımları ise yayvan bir değişim göstermekte ve herhangi bir ikincil pik oluşmamaktadır. $H/W(D)=1$ açıklık oranı için, slot ve dairesele jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde farklı Reynolds sayılarında elde edilen Nusselt dağılımları Şekil 7b’de verilmektedir. $H/D=1$ açıklık oranında, dairesele jete ait Nusselt dağılımlarındaki ikincil piklerin konumları $x/D \approx \pm 1$ ve 3 değerlerine kaymaktadır. $H/D=3$ açıklık oranında ise dairesele jete ait Nusselt dağılımlarındaki ikincil piklerin etkisi hafiflemektedir (Şekil 7c). $H/D=6$ açıklığına ait Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 7d’de, hem slot hem de dairesele jette, Nusselt sayılarındaki ikincil piklerin kaybolduğu görülmektedir.



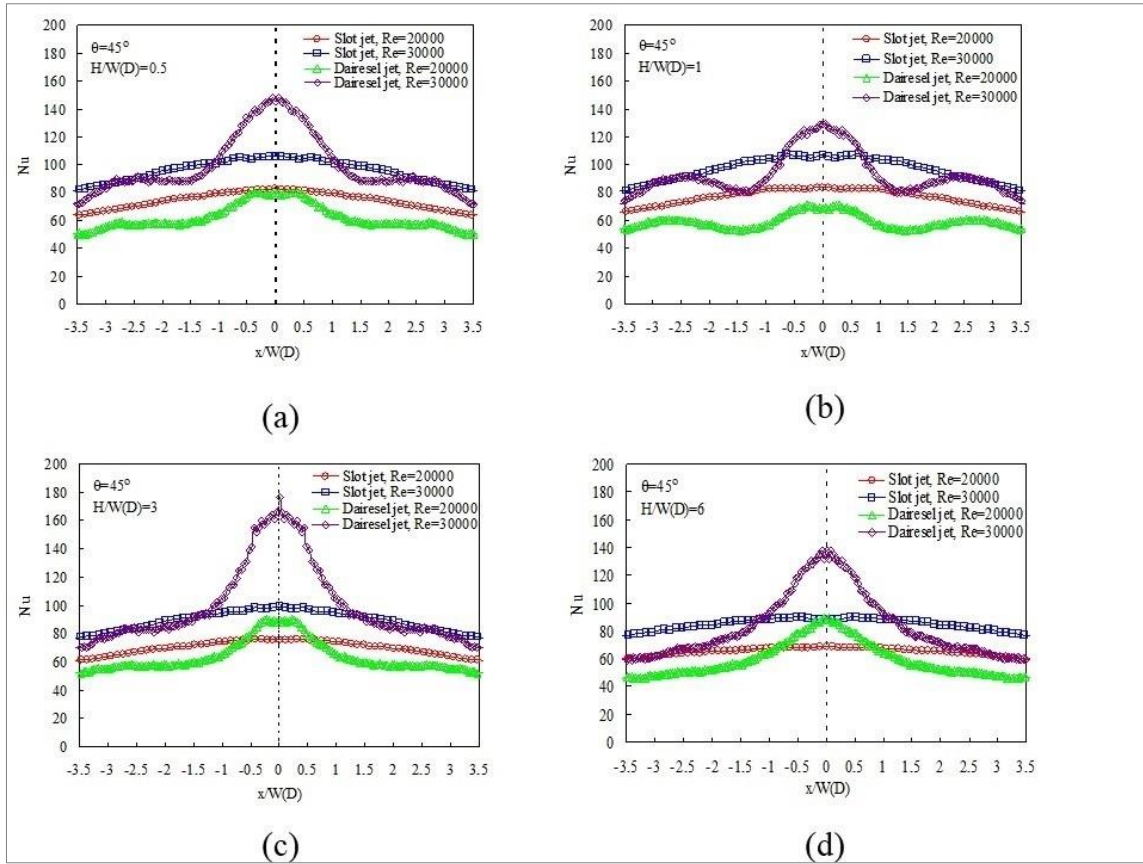
Şekil 7. $\theta=30^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları (a) $H/W(D)=0.5$ (b) $H/W(D)=1$ (c) $H/W(D)=3$ (d) $H/W(D)=6$

$\theta = 45^\circ$ Eğimli Levhalar ile Sınırlandırılmış Jet

Sınırlandırıcı levha eğim açısı $\theta=45^\circ$ için, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde slot ve dairesel jet akış sistemlerinde çarpma levhası merkez eksenini doğrultusunda elde edilmiş olan Nusselt dağılımları levhalar arası açıklık oranı değerinin $H/W(D)=0.5, 1, 3$ ve 6 olduğu durumlar için Şekil 8’de verilmiştir. $H/W(D)=0.5$ değeri için, iki farklı Reynolds sayısında slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde orta eksen boyunca Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 8a’da, artan Reynolds sayısı ile birlikte çarpma levhası yüzeyi boyunca Nusselt değerlerinde artışlar olduğu görülmüştür. Çarpma levhaları üzerinde lüle eksenini doğrultusundaki durma noktalarında yerel Nusselt sayıları maksimum değer almaktadır. Dairesel jete ait Nusselt dağılımlarında, durma noktasından $x/D \approx \pm 2.5$ kadar ileride ikincil pikler oluşmaktadır. Bu ikincil pik ve artışlar artan Reynolds sayısı ile daha belirgin olmaktadır. Slot jete ait Nusselt dağılımları ise yayvan bir değişim göstermekte ve herhangi bir ikincil pik oluşmamaktadır.

$H/W(D)=1$ açıklık oranı için, slot ve dairesel jetlere ait çarpma levhalarının üzerinde farklı Reynolds sayılarında elde edilen Nusselt dağılımları Şekil 8b’de verilmektedir. $H/D=1$ açıklık oranında, dairesel jete ait Nusselt dağılımlarında yine $x/D \approx \pm 2.5$ konumunda ikincil pikler oluşmaktadır. $H/W(D)=3$ ve

$H/W(D)=6$ açıklık oranlarında, slot ve dairesel jetlere ait Nusselt dağılımlarında herhangi bir ikincil pik oluşmamaktadır (Şekil 8c ve 8d).



Şekil 8. $\theta=45^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları, (a) $H/W(D)=0.5$, (b) $H/W(D)=1$, (c) $H/W(D)=3$, (d) $H/W(D)=6$

Çarpan slot jet akışında, sınırlayıcı levha eğim açısının, Reynolds sayısının ve sınırlayıcı levha-çarpma levhası arası açıklığın farklı değerleri için çarpma levhası yüzeyi boyunca ölçümlenen sıcaklık değerleri ve dağılımları beraber değerlendirildiğinde, sınırlayıcı levha eğim açısının ($\theta=0^\circ$) ve levhalar arası açıklık oranı değerinin ($H/W=0.5$ ve 1) küçük olduğu durumlarda çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarında ikincil piklerin ortaya çıktığı, sınırlayıcı levha eğim açısı ($\theta=15^\circ$, 30° ve 45°) değerlerinin büyük olduğu durumlarda ise levhalar-arası açıklığın hiçbir değerinde ikincil piklerin oluşmadığı görülmüştür. Çarpan dairesel jet akışında, sınırlayıcı levha eğim açısının, Reynolds sayısının ve sınırlayıcı levha-çarpma levhası arası açıklığın farklı değerleri için çarpma levhası yüzeyi boyunca ölçümü gerçekleştirilen sıcaklık değerleri ve dağılımları beraber değerlendirildiğinde, sınırlayıcı levha eğim açısının ($\theta=0^\circ$ ve 15°) ve levhalar arası açıklık oranı değerinin ($H/D=0.5$ ve 1) küçük olduğu durumlarda çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarında ikincil piklerin daha belirgin olduğu, sınırlayıcı levha eğim açısının ($\theta=30^\circ$ ve 45°) ve levhalar arası açıklık oranının ($H/D=3$ ve 6) büyük değerlerinde ikincil piklerin etkisinin azaldığı görülmektedir. Çarpma levhaları üzerindeki Nusselt dağılımlarında ortaya çıkan ikincil piklerin dairesel jette daha belirgin ve yaygın olduğu ve konumlarının sınırlayıcı levha eğim açısından etkilendiği görülmüştür.

Sonuçlar

Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, çarpan slot ve dairesel jet akış alanlarındaki hedef çarpma levhası yüzeyleri boyunca ısı transferi etkilerini incelemiştir. Sıcaklık değerleri ve dağılımları bir termal kamera ile görüntüleme yapılarak ölçümlenmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımları, çarpma levhasının merkez eksenini boyunca incelenmiştir. Bu sıcaklık dağılımları üzerinden, Reynolds sayısı, levhalar arası açıklık oranı ve sınırlandırıcı levha eğim açısı parametrelerinin çarpma levhasındaki Nusselt dağılımları üzerine etkisi araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Sınırlandırılmış çarpan slot ve dairesel jet akışlarında, çarpma levhası üzeri boyunca Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile birlikte artmakta, artan levhalar arası açıklık oranı ile azalmaktadır. Levhalar arası açıklığın $H/W(D) \leq 1$ ve sınırlayıcı levha eğim açısının $\theta \leq 15^\circ$ olduğu durumlarda, çarpma levhası üzerindeki Nusselt sayısı dağılımlarında ikincil pikler oluşmaktadır. Levhalar arası açıklık oranı arttıkça, ikincil piklerin etkisi azalmakta ve konumları levha uçlarına doğru ilerlemektedir.
2. Sınırlandırılmış çarpan slot jet akışında, çarpma levhası yüzeyindeki Nusselt dağılımları, artan sınırlandırıcı levha eğim açısı ve artan levhalar arası açıklık oranıyla olumsuz etkilenmektedir.
3. Artan sınırlandırıcı levha eğim açısı ile birlikte, slot jetlerde ikincil pikler hızla kaybolurken, dairesel jetlerde bu durumun daha yavaş olmaktadır.

Mevcut çalışma esas olarak çarpan slot ve dairesel jetlerde ısı transferi performansının sınırlayıcı levha durumuna göre karşılaştırılıp değerlendirilmesi üzerine odaklanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlarda boyutsuz radyal ve aksel mesafeler boyunca ortaya çıkan ikincil artışların, hedef çarpma levhası yüzeyinden daha fazla ısının daha homojen bir şekilde süpürülmesine olanak sağladığı görülmektedir. Özellikle elektronik devre elemanlarının soğutulmasında yüzeyin daha homojen bir şekilde soğutulması, söz konusu elemanların ömürleri ve performansları için oldukça kritiktir. Çarpan jetlerde eğimli sınırlandırıcı levha kullanımının, elektronik devre elemanlarında yüzey boyunca ortaya çıkan sıcaklık değişimlerinin neden olduğu stresin azaltılmasına katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür Bu çalışma K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Hidrolik ve Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları çalışma alanı ve verdikleri ekipman desteği için teşekkür ederiz.

Fon/Finansman Bilgileri Bu çalışma için herhangi bir kurum ve/veya kuruluşun destek alınmamıştır.

Etik Kurul Onayı ve İzinler Çalışma, etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

Çıkar Çatışmaları/Çatışan Çıkarlar Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur

Yazarların Katkısı Haluk KELEŞ makaleye %50 oranında katkıda bulunmuş, deneyleri gerçekleştirmiş, analiz etmiş ve grafikleri hazırlamıştır. Yücel ÖZMEN makaleye %50 oranında katkıda bulunmuş, grafikleri yorumlamış ve makaleyi yazmıştır

Kaynaklar

- [1] Danek, C. J. (1995). *Heat transfer under impinging jets at very close jet-to-target spacings*. [Doktora Tezi, Stanford Üniversitesi, Ann Arbor, ABD].
- [2] Gardon, R., & Akfirat, J. C. (1965). The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8(10), 1261-1272. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(65\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(65)90054-2)
- [3] Livingood, J. N. B., Hrycak, P., & Hrycak, P. (1973), Impingement heat transfer from turbulent air jets to flat plates: a literature survey. NASA Technical Memorandum, Ohio, ABD. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19730016200/downloads/19730016200.pdf>
- [4] Senter, J., & Solliec, C. (2007). Flow field analysis of a turbulent slot air jet impinging on a moving flat surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(4), 708-719. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.08.002>
- [5] Cavadas, A. S., Pinho, F.T., & Campos, J. B. L. M. (2012). Laminar flow field in a viscous liquid impinging jet confined by inclined plane walls. *International Journal of Thermal Sciences*, 59, 95-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.04.004>
- [6] Özmen, Y., & Kinay, H. (2023). Investigation of flow and heat transfer characteristics of impinging slot jets confined with inclined plates. *Heat Mass Transfer*, 59, 509–534. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03279-y>
- [7] Kunugi, T., & Kawamura, H. (1987, Ekim). *Application of a Two-Equation Turbulence Model to Heat Transfer and Fluid Flow of an Impinging Round Jet*. 2nd International Symposium on Transport Phenomena in Turbulent Flows, Tokyo, Japonya.
- [8] Chiriac, V. A., & Ortega, A. (2002). A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(6), 1237-1248. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00224-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00224-1)
- [9] Yousefi-Lafouraki, B., Ramiar, A., & Ranjbar, A. A. (2014). Laminar forced convection of a confined slot impinging jet in a converging channel. *International Journal of Thermal Sciences*, 77, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.014>
- [10] Schrader, H. (1961). *Trocknung feuchter Oberflächen mittels Warmluftstrahlen*, VDI-Verl. Düsseldorf.
- [11] Goldstein, R. J., Sobolik, K. A., & Seol, W. S. (1990). Effect of entrainment on the heat transfer to a heated circular air jet impinging on a flat surface. *ASME Journal of Heat Transfer*, 112(3), 608-611. <https://doi.org/10.1115/1.2910430>
- [12] Baughn, J. W., & Shimizu, S. (1989). Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. *Journal of Heat Transfer*, 111(4), 1096-1098. <https://doi.org/10.1115/1.3250776>
- [13] Popiel, C. O., & Trass, O. (1991). Visualization of a free and impinging round jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 4(3), 253-264. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(91\)90043-Q](https://doi.org/10.1016/0894-1777(91)90043-Q)
- [14] Mohanty, A. K., & Tawfek, A. A. (1993). Heat transfer due to a round jet impinging normal to a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(6), 1639-1647. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(05\)80073-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(05)80073-0)

- [15] Huang, L., & El-Genk, M. S. (1994). Heat transfer of an impinging jet on a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(13), 1915-1923. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90331-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90331-X)
- [16] Lytle, D., & Webb, B. W. (1994). Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(12), 1687-1697. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90059-0)
- [17] Colucci, D. W., & Viskanta, R. (1996). Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13(1), 71-80. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(96\)00015-5](https://doi.org/10.1016/0894-1777(96)00015-5)
- [18] Baydar, E. (1999). Confined impinging air jet at low reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 19(1), 27-33. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(98\)10044-4](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(98)10044-4)
- [19] Baydar, E., & Özmen, Y. (2005). An experimental and numerical investigation on a confined impinging air jet at high reynolds numbers. *Applied Thermal Engineering*, 25(2-3), 409-421. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.05.016>
- [20] Özmen, Y., & Baydar, E. (2008). Flow structure and heat transfer characteristics of an unconfined impinging air jet at high jet reynolds numbers. *Heat and Mass Transfer*, 44(11), 2008, 1315-1322. <https://doi.org/10.1007/s00231-008-0378-4>
- [21] Miranda, J. M., & Campos, J. B. L. M. (1999). Impinging jets confined by a conical wall: Laminar flow predictions. *AIChE Journal*, 45, 2273-2285. <https://doi.org/10.1002/aic.690451103>
- [22] Behnia, M., Parneix, S., Shabany, Y., & Durbin, P. A. (1999). Numerical study of turbulent heat transfer in confined and unconfined impinging jets. *International Journal of Heat Fluid Flow*, 20, 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(98\)10040-1](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(98)10040-1)
- [23] Herrero, R., & Buchlin, J. M. (2010, Temmuz 24-29). *Effect of nozzle shape on local heat transfer distribution in impinging jets*. 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Quebec, Kanada. <https://doi.org/10.21611/qirt.2010.054>
- [24] Lee, D. H., Bae, J. R., Park, H. J., Lee, J. S. & Ligrani, P. (2011). Confined, milliscale unsteady laminar impinging slot jets and surface nusselts numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54:2408–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.021>
- [25] Cavadas, A. S., Pinho, F. T. & Campos, J. B. L. M. (2012). Laminar flow field in a viscous liquid impinging jet confined by inclined plane walls. *International Journal of Thermal Sciences*, 59, 95-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.04.004>
- [26] Al Mubarak, A. A., Shaahid, S. M. & Al-Hadhrami, L. M. (2013). Heat transfer in a channel with inclined target surface cooled by single array of centered impinging jets. *Thermal Science*, 17, 1195-1206. <https://doi.org/10.2298/TSCII10630010A>
- [27] Yousefi-Lafouraki, B., Ramiar, A., & Ranjbar, A. A. (2014). Laminar forced convection of a confined slot impinging jet in a converging channel. *International Journal of Thermal Sciences*, 77, 130-138, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.014>
- [28] Bhagwat, A., & Sridharan, A. (2017). Numerical simulation of oblique air jet impingement on a heated flat plate. *Journal of Thermal Science and Engineering Application.*, 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4034913>

- [29] Li, Y., Li, B., Qi, F., & Cheung, S. C. P. (2018). Flow and heat transfer of parallel multiple jets obliquely impinging on a flat surface. *Applied Thermal Engineering*, 10, 2174–2185. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.064>
- [30] Di Venuta, I., Boghi, A., Petracci, I. & Gori, F. (2023). Heat transfer on a flat wall due to a rectangular turbulent jet. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 144, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106769>
- [31] Joshi, J. & Sahu, S. K. (2023). Effect of single and multiple protrusions on thermal performance of slot jet impingement with curved surface. *Applied Thermal Engineering*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120757>
- [32] Talapati, R. J. & Katti, V. V. (2022). Influence of synthetic air jet temperature on local heat transfer characteristics of synthetic air jet impingement. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 130, 105796. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105796>
- [33] Javidan, M. & Moghadam, A. J. (2022). Effective cooling of a photovoltaic module using jet-impingement array and nanofluid coolant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106310>
- [34] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Introduction to Heat Transfer*. Wiley, Sixth Edition. New Jersey, ABD.
- [35] Lloyd, J. R., & Moran, W. R. (1974). Natural convection adjacent to horizontal surface of various planforms. *Journal of Heat Transfer*, 96, 443-447. <https://doi.org/10.1115/1.3450224>
- [36] Churchill, S. W., & Chu, H. H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90243-4)
- [37] Kline, S., & McClintock, F. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.